

*Матвеева К.Ф., Злобин А.С., Селиванова Е.Е., Попов А.Д.,
Таракановский К.В.*

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ШЕСТЕРНЯХ

Остаточные напряжения в шестернях существенно влияют на их срок службы и эксплуатационные характеристики. Для предотвращения отказов необходим точный анализ этих напряжений, что возможно благодаря неразрушающим методам, таким как рентгеновская дифракция и ультразвуковая диагностика. Компьютерное моделирование и метод конечных элементов дают детальное представление о распределении напряжений, улучшая производство и качество шестерён [1]. В статье рассматриваются современные методы оценки остаточных напряжений и их влияние на свойства. Неразрушающие методы, включая рентгеновскую дифракцию и ультразвуковую диагностику, позволяют выявлять напряжения без повреждения деталей, экономя ресурсы и время [2].

Метод рентгеновской дифракции основан на анализе изменений кристаллической решётки под действием внутренних напряжений, что отражается в изменении углов дифракции рентгеновских лучей. Основное уравнение, описывающее дифракцию рентгеновских лучей на кристаллических плоскостях, выражается законом Брэгга:

$$2dsi n \theta = n\lambda,$$

где d – межплоскостное расстояние в кристалле; θ – угол дифракции; n – порядок дифракции (целое число); λ – длина волны рентгеновского излучения.

Изменение межплоскостного расстояния d вследствие остаточных напряжений приводит к изменению угла дифракции θ . Деформация ε связана с изменением межплоскостного расстояния следующим образом:

$$\varepsilon = (d - d_0)/d_0,$$

где d_0 – межплоскостное расстояние в ненапряжённом состоянии. Связь между деформацией и напряжением описывается законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где σ – напряжение; E – модуль Юнга материала.

Для определения остаточных напряжений под различными углами используется метод $\sin^2\psi$, где ψ – угол наклона образца относительно пучка рентгеновского излучения [3].

Уравнение для расчёта деформации:

$$\varepsilon_\phi(\psi) = \frac{d_\phi(\psi) - d_0}{d_0} = \frac{\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi}{E} \sin^2 \psi + \varepsilon_0,$$

где $\varepsilon_\phi(\psi)$ – деформация в направлении ϕ при угле ψ ; σ_1 и σ_2 – главные напряжения в плоскости образца; ε_0 – деформация при $\psi = 0$; ϕ – азимутальный угол, определяющий направление измерения.

Ультразвуковая диагностика – эффективный неразрушающий метод для оценки остаточных напряжений в шестернях. Принцип метода заключается в том, что напряжённо-деформированное состояние материала влияет на скорость и характеристики ультразвуковых волн. Изменения в скорости волн, вызванные физико-механическими свойствами материала, позволяют определить остаточные напряжения [3]. Связь между скоростью ультразвуковой волны и напряжением описывается следующим образом:

$$\Delta v = k\sigma,$$

где Δv – изменение скорости ультразвуковой волны; k – коэффициент, зависящий от свойств материала и типа волны; σ – остаточное напряжение.

Акустическая эмиссия (АЭ) – это высвобождение энергии в виде упругих волн, которые регистрируются датчиками. Остаточные напряжения в шестернях могут вызывать релаксационные процессы

под воздействием нагрузок, что сопровождается АЭ-сигналами. Высокая чувствительность метода позволяет обнаруживать дефекты на ранних стадиях и принимать меры для предотвращения отказов. Сочетание АЭ с современными методами обработки данных делает его перспективным инструментом для повышения надёжности механических систем. Инерционные эффекты и динамические нагрузки при вращении шестерён также влияют на остаточные напряжения [4].

Моделирование остаточных напряжений методом конечных элементов – важный инструмент машиностроения, позволяющий прогнозировать поведение шестерён и оптимизировать их разработку. Это повышает надёжность, долговечность и эффективность механических систем, что критично при высоких требованиях к качеству.

Метод сверлового разгрузочного отверстия, один из популярных разрушающих методов, измеряет деформации вокруг отверстия, вызванные перераспределением остаточных напряжений, и используется для их оценки с помощью тензометрических датчиков. Измеренные деформации ε связаны с компонентами напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} следующим образом:

$$\varepsilon_i = a_i \sigma_x + b_i \sigma_y + c_i \tau_{xy},$$

где a_i , b_i , c_i – коэффициенты, зависящие от ориентации тензодатчика i .

Обратным решением системы уравнений определяются компоненты остаточных напряжений:

$$\begin{cases} \sigma_x = f_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \\ \sigma_y = f_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \\ \tau_{xy} = f_3(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3), \end{cases}$$

где функции f_1 , f_2 , f_3 определяются на основе теории упругости и калибровочных коэффициентов.

Метод расслаивания позволяет определить распределение остаточных напряжений по глубине материала, что особенно важно для деталей, подвергшихся поверхностной обработке, такой как закалка

или цементация. Измеренные деформации (ε) связаны с остаточными напряжениями (σ) следующим образом:

$$\varepsilon(z) = \frac{1}{E} \int_z^h \sigma(z') dz',$$

где $\varepsilon(z)$ – деформация после удаления слоя до глубины z ; E – модуль Юнга материала; $\sigma(z')$ – остаточное напряжение на глубине z' ; h – общая толщина образца.

Решение обратной задачи позволяет определить распределение $\sigma(z)$ на основе измеренных деформаций $\varepsilon(z)$. Для этого используются методы численного интегрирования и специализированные алгоритмы, такие как метод Максвелла или алгоритмы на основе конечных разностей.

Метод вырезки – разрушающий способ оценки остаточных напряжений через измерение деформаций или перемещений после удаления части материала. Он помогает определить средние напряжения в заданной области и анализировать напряжённое состояние детали. Для шестерён этот метод используется для оценки напряжений в зубьях и других критически нагруженных зонах.

Остаточное напряжение σ можно определить по формуле:

$$\sigma = \frac{E\Delta l}{l},$$

где E – модуль Юнга материала; Δl – изменение длины полоски после вырезки; l – первоначальная длина полоски.

При удалении материала из детали возникают перераспределения напряжений, которые могут быть измерены и использованы для расчёта остаточных напряжений [5]. Если предположить, что разрезание приводит к открытию щели шириной δ , то среднее остаточное напряжение σ можно определить, как:

$$\sigma = \frac{E\delta}{2h},$$

где δ – измеренное раскрытие щели; h – высота или толщина детали в месте разреза.

В сложных случаях, когда геометрия детали сложна, для моделирования процесса разрезания и расчёта остаточных напряжений используют метод конечных элементов (МКЭ). Определение остаточных напряжений в шестернях – сложная задача, требующая разных методов анализа. Выбор подходящего метода зависит от точности, глубины проникновения, доступности оборудования и характера метода – разрушающего или неразрушающего (табл. 1 и 2).

Табл. 1. Преимущества и ограничения по методам измерения

Методы	Преимущества	Ограничения
Неразрушающие методы		
Рентгеновская дифракция	<p>Высокая точность измерений на поверхности и в приповерхностных слоях.</p> <p>Способность обнаруживать остаточные напряжения в кристаллической решётке материала.</p> <p>Неразрушающий характер, позволяющий проводить контроль без повреждения детали.</p>	<p>Неглубокая зона проникновения (несколько мк), что ограничивает анализ внутренних слоёв.</p> <p>Требование специального оборудования и мер безопасности при работе с ионизирующим излучением.</p> <p>Чувствительность к текстуре и фазовому составу материала.</p>
Ультразвуковая диагностика	<p>Способность проникать на значительную глубину (до нескольких сантиметров).</p> <p>Оперативность и возможность использования в полевых условиях.</p> <p>Безопасность и относительная простота оборудования.</p>	<p>Чувствительность к структурным неоднородностям и зернистости материала.</p> <p>Требует калибровки на образцах с известными напряжениями.</p> <p>Ограниченнная точность в сравнении с другими методами.</p>
Метод акустической эмиссии	<p>Высокая чувствительность к зарождению и развитию дефектов.</p> <p>Возможность непрерывного мониторинга в реальном времени.</p> <p>Способность локализовать источники напряжений.</p>	<p>Сложность интерпретации сигналов и необходимость фильтрации шумов.</p> <p>Требует высокого уровня квалификации оператора.</p> <p>Не всегда позволяет количественно оценить величину напряжений.</p>

Продолжение табл. 1.

Методы	Преимущества	Ограничения
Компьютерное моделирование и МКЭ	<p>Позволяет получить детальное распределение остаточных напряжений по всей конструкции.</p> <p>Возможность моделирования различных сценариев нагрузки и технологических процессов.</p> <p>Экономия времени и ресурсов за счёт сокращения количества экспериментальных испытаний.</p>	<p>Зависимость от точности исходных данных и корректности модели.</p> <p>Высокие требования к вычислительным ресурсам и квалификации персонала.</p> <p>Необходимость верификации результатов с экспериментальными данными.</p>
Разрушающие методы		
Метод сверлового разгрузочного отверстия	<p>Высокая точность в определении локальных напряжений.</p> <p>Относительная простота и доступность оборудования.</p> <p>Возможность получения профиля напряжений по глубине.</p>	<p>Разрушающий характер – деталь после измерений непригодна для эксплуатации.</p> <p>Ограничение по глубине измерений (до нескольких миллиметров).</p> <p>Требует высокой точности установки и сверления.</p>
Метод расслаивания	<p>Позволяет получить распределение напряжений по глубине материала.</p> <p>Высокая точность при правильном выполнении.</p>	
Метод вырезки	<p>Простота реализации и несложное оборудование.</p> <p>Подходит для определения средних остаточных напряжений в больших областях.</p>	
Метод сечения (разреза)	<p>Способность определять остаточные напряжения на значительной глубине.</p> <p>Применимость к деталям сложной формы.</p>	

Табл. 2. Сравнительный анализ методов

Метод	Тип	Глубина анализа	Точность	Метод	Оборудование	Квалиф. персонала
Рентгеновская дифракция	Неразрушающий	Поверхностный	Высокая	Неразрушающий	Специализированное	Высокая
Ультразвуковая диагностика	Неразрушающий	До нескольких см	Средняя	Неразрушающий	Доступное	Средняя
Метод акустической эмиссии	Неразрушающий	Глубокий	Зависит от условий	Неразрушающий	Специализированное	Высокая
Компьютерное моделирование (МКЭ)	Моделирование	Любая	Высокая (при верификации)	-	Высоко производительное	Высокая
Метод сверлового разгрузочного отверстия	Разрушающий	До нескольких мм	Высокая	Разрушающий	Доступное	Средняя
Метод расслаивания	Разрушающий	Поверхностный	Высокая	Разрушающий	Простое	Средняя
Метод вырезки	Разрушающий	Зависит от вырезки	Средняя	Разрушающий	Простое	Низкая
Метод сечения (разреза)	Разрушающий	Глубокий	Средняя	Разрушающий	Простое	Средняя

Заключение

Для точного измерения поверхностных напряжений предпочтительны рентгеновская дифракция и метод сверлового отверстия, а для глубинного анализа – ультразвуковая диагностика и акустическая эмиссия. Компьютерное моделирование, в сочетании с экспериментальными методами, помогает верифицировать модели и прогнозировать поведение шестерён. Разрушающие методы применимы в исследованиях и контроле качества новых технологий и материалов.

Библиографический список

1. Кирличев, В.А. Моделирование остаточного напряжённого состояния поверхности упрочнённых деталей по остаточным напряжениям образца-свидетеля / В.А. Кирличев, В.С. Вакулюк, А.С. Букатый, О.В. Карапаева, В.В. Лунин // Известия СНЦ РАН. – 2014. – Вып. 16. – № 6(2). – С. 461-464.
2. Вакулюк, В.С. Определение остаточных напряжений в шлицевых деталях по первоначальным деформациям образца-свидетеля / В.С. Вакулюк, В.К. Шадрин, В.В. Алёшкин, Д.В. Анохин, Л.В. Денисов // Известия СНЦ РАН. – 2016. – Вып. 18. – № 1(2). – С. 158-160.
3. Вакулюк, В.С. Остаточные напряжения и сопротивление усталости зубчатых колёс / В.С. Вакулюк, Ю.П. Ковалкин, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Вып. 17. – № 1. – С. 118-127.
4. Биргер, И.А. Остаточные напряжения. / Биргер И.А. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
5. Башаров, Р.Р. Анализ причин и источников возникновения остаточных напряжений / Р.Р. Башаров, Л.Р. Кильметова, С.В. Старовойтов, С.Х. Хадиуллин, П.П. Черников // Вестник УГАТУ. – 2018. – №4 (82). – С. 3-11.